

УДК 661.25.66.097

**В.И. Тошинский, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой,
В.Л. Голуб, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,
А.В. Медяник, аспирант**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
(НТУ «ХПИ»), г. Харьков

РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ МАССООБМЕННОЙ НАСАДКИ

Представлены сравнительные гидродинамические характеристики новых массообменных насадок и колец Рашига. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что изменения в геометрии колец Рашига приводят к уменьшению гидродинамического сопротивления, и, как следствие, к сокращению затрат энергоресурсов.

Ключевые слова: массообменные контактные элементы, гидродинамическое сопротивление, гофрированная насадка, кольца Рашига

В химической технологии одними из основных являются процессы массопередачи. В настоящее время в промышленных условиях такие процессы в основном реализуются в насадочных аппаратах с контактными массообменными элементами в виде гладких колец Рашига, уложенных «в навал». Такая насадка характеризуется простотой изготовления и низкой стоимостью, но имеет существенные недостатки – относительно малую удельную поверхность и довольно большое гидродинамическое сопротивление. Первый параметр ведет к снижению скорости массообмена, второй – к увеличению энергозатрат. Поэтому, проблема создания эффективной насадки с пониженным гидродинамическим сопротивлением является актуальной и экономически важной.

Для повышения эффективности технологических показателей насадка должна иметь:

- большую долю свободного объема для достижения высоких гидродинамических показателей (низкого гидродинамического сопротивления, большой пропускной способности)
- развитую удельную геометрическую поверхность для обеспечения высоких массообменных характеристик.

Однако увеличение последней может привести к росту турбулизации газожидкостной системы, а, значит – к увеличению гидродинамического сопротивления. Поэтому при разработке новых массообменных контактных элементов необходимо обеспечить оптимальное соотношение между свободным объемом и удельной поверхностью насадки.

Авторами разработана гофрированная винтовая керамическая насадка [1], которая представляет собой цилиндр, внутренняя и внешняя поверхности которого выполнены в виде гофр (рис. 1). Амплитуда гофр составляет 3 мм, а длина волны гофр – 5 мм.

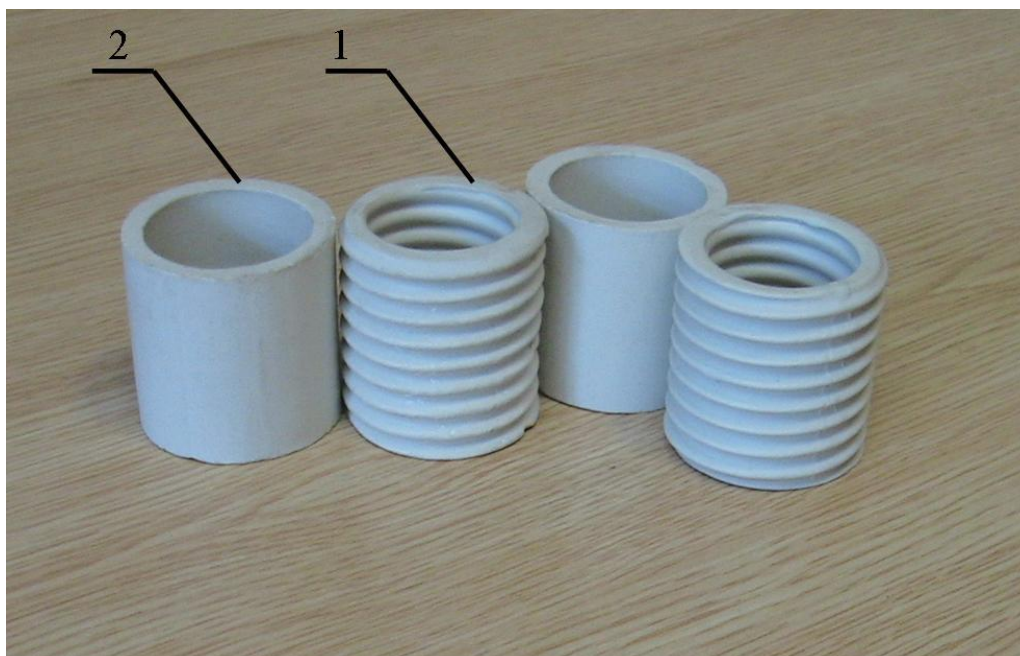


Рисунок 1 – Гофрированная винтовая насадка (1) и кольца Рашига (2)

Основные конструктивные характеристики колец Рашига [2] и новой гофрированной насадки приведены в табл. 1. Типоразмер обеих насадок – 50x50x5 мм.

Таблица 1 – Основные характеристики кольцевых контактных массообменных элементов

Тип насадки	Вес элемента, кг	Число элементов в 1 м ³	Поверхность элемента, м ²	Удельная поверхность, м ² /м ³	Свободный объем, м ³ /м ³
Кольца Рашига	0,0835	6000	0,016	96,0	0,78
Насадка гофрированная	0,078	6000	0,028	120	0,89

Как видно из табл. 1, гофрированная винтовая насадка при тех же габаритах, что и кольца Рашига, превосходит последние как по свободному объему ε (на 14 %), так и по удельной поверхности a (на 25 %). В связи с этим, можно предположить, что использование винтовой гофрированной насадки приведет к снижению гидродинамического сопротивления и, как следствие, к повышению скорости массообмена. Для проверки этого предположения были экспериментально изучены гидродинамические характеристики новой насадки. Для сравнения

аналогичные исследования были проведены и для гладких колец Рашига таких же геометрических размеров. Эксперименты проводились на испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 2. Насадка засыпалась «в навал», общая высота ее слоя составила 1 м.

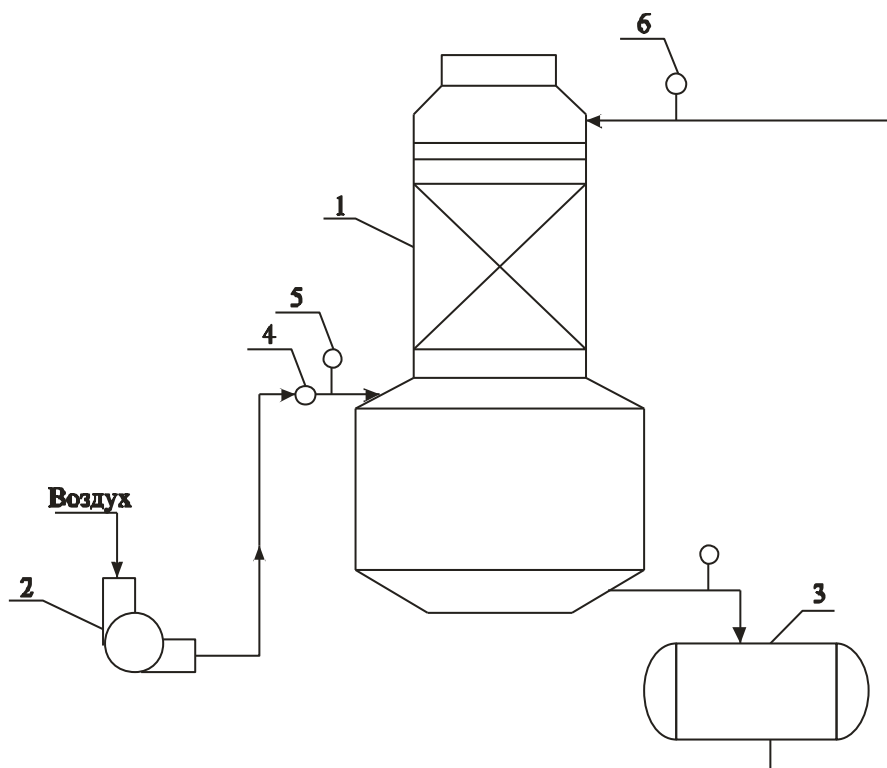


Рисунок 2 – Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – колонна, заполненная насадками; 2- воздуходувка; 3 – емкость с аммиачной водой;
4 – расходомер воздуха; 5, 6, 7 – термометры

Для определения гидродинамического сопротивления двухфазного потока в насадочной колонне, вначале рассмотрим сопротивление сухого аппарата (в отсутствие орошения жидкостью). Потери давления (ΔP) на 1 м высоты (H) сухой насадки определяется выражением [2]:

$$\frac{\Delta P_z}{H} = \lambda_z \cdot \frac{\rho_z \cdot u_z^2}{2 \cdot d_z}, \quad (1)$$

где λ_z – коэффициент сопротивления сухого аппарата;

ρ_z – плотность газа;

u_z – линейная скорость газа в колонне с насадкой;

d_z – эквивалентный диаметр канала, по которому движется газ.

Зависимость сопротивления сухой насадки от линейной скорости газа не является квадратичной, как это может показаться из формулы (1). Это связано с тем, что коэффициент λ_z зависит от числа Re. Например, для турбулентного потока [2]:

$$\lambda \sim \frac{1}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (2)$$

а так как $\text{Re} \sim u_z$, то

$$\frac{\Delta P_z}{H} \sim u_z^{1,8}. \quad (3)$$

Искаженные формулы – обратиться к авторам!

Изучение гидродинамических характеристик гофрированных массообменных элементов проводилось в широком диапазоне значений линейной скорости воздуха – от 0,5 до 2 м/с и плотности орошения – от 0 до 30 м³/(м²час).

На рис. 3 представлены данные, которые позволяют сопоставить гидродинамическое сопротивление сухой гофрированной насадки и колец Рашига. Из графиков видно, что при увеличении линейной скорости газа до 1,4 м/с гидравлическое сопротивление одной и другой насадки увеличивается практически прямо пропорционально, а при дальнейшем увеличении скорости газа гидродинамическое сопротивление растет по экспоненциальному закону. Существенное преимущество гофрированной насадки наблюдается в диапазоне высоких значений линейной скорости газа, начиная с 2,0 м/с. При линейной скорости 2,5 м/с сопротивление гофрированной насадки на 20 % ниже, чем сопротивление колец Рашига.

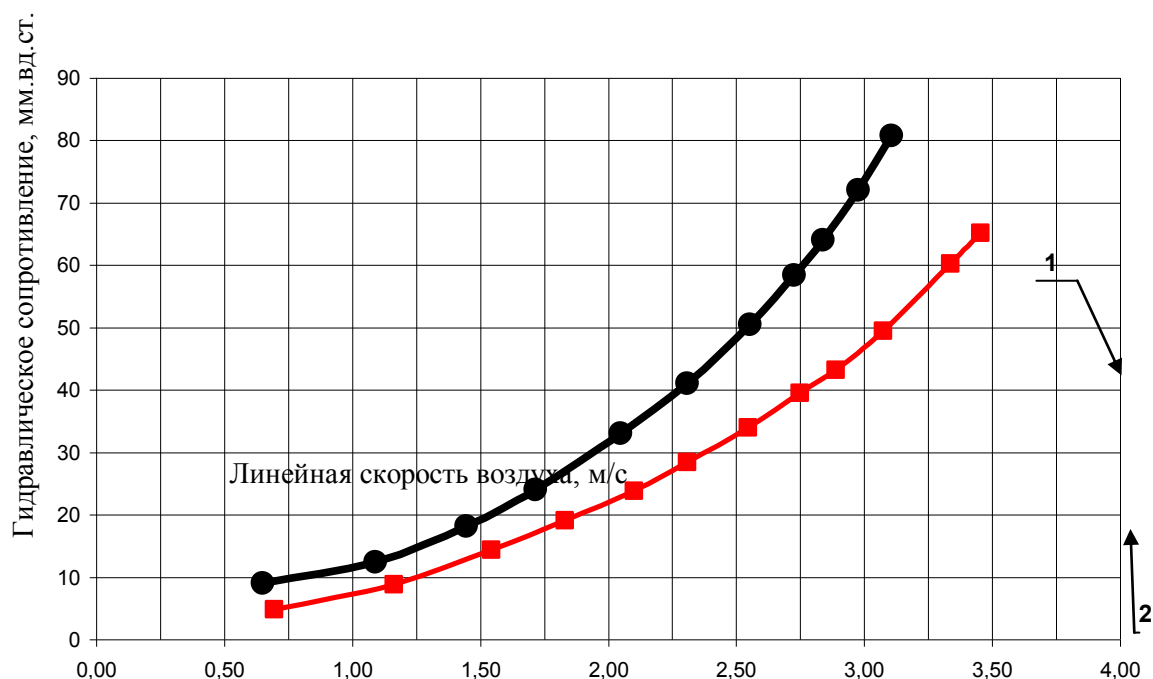


Рисунок 3 – Зависимость гидродинамического сопротивления сухой насадки от линейной скорости воздуха:

1 – кольца Рашига, 2 – гофрированная винтовая насадка

Полученные экспериментальные данные были обработаны методом наименьших квадратов. В результате были получены следующие зависимости для сопротивления сухих насадок $\Delta P_{\text{сух.}}$:

$$\frac{\Delta P_{\text{сух.}}}{H} = 10,4 \cdot u_z^{1,83} \text{ – стандартные кольца Рашига;} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P_{\text{сух.}}}{H} = 7,4 \cdot u_z^{1,82} \text{ – гофрированная винтовая насадка.} \quad (5)$$

Показатели степени при u_z , полученные в экспериментах (4, 5) хорошо согласуются с вышеприведенным теоретическим (3).

Как показано в [2], для сопротивления сухих насадок имеет место соотношение:

$$\frac{\Delta P_{\text{сух.}}}{H} \sim \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \lambda_0 \quad (6)$$

При турбулентном движении [2]:

$$\lambda_0 = 16 / \text{Re}^{0,2} \quad (7)$$

Если учесть, что $Re \sim \frac{1}{a}$, так как в критерий Рейнольдса входит истинная скорость газа, то

$$\frac{\Delta P_{\text{сх.}}}{H} \sim \frac{a^{1,2}}{\varepsilon^3} \quad (8)$$

Как видно из (8), сопротивление сухой насадки растет вместе с удельной поверхностью a , и убывает с увеличением свободного объема ε . При этом, зависимость от ε значительно сильнее, чем от a . Этим, хотя и не полностью, может объясняться тот экспериментально обнаруженный факт, что сопротивление сухой гофрированной насадки меньше, чем для колец Рашига. Однако нами не были учтены некоторые другие факторы (например извилистость каналов, по которым движется воздух), которые могли привести к изменению $\Delta P_{\text{сх.}}$. Определение таких параметров и степень их влияния на гидравлическое сопротивление в колонне, на данном этапе является сложным и будет рассмотрено в дальнейшем.

На рис. 4 представлен график зависимости гидродинамического сопротивления орошаемой гофрированной насадки и колец Рашига от линейной скорости воздуха при плотности орошения 10 и 20 м³/(м²час).

Как видно из рисунка гидродинамическое сопротивление гофрированной насадки ниже, чем колец Рашига на 20–25 % во всем диапазоне изменений линейной скорости воздуха и при различных плотностях орошения.

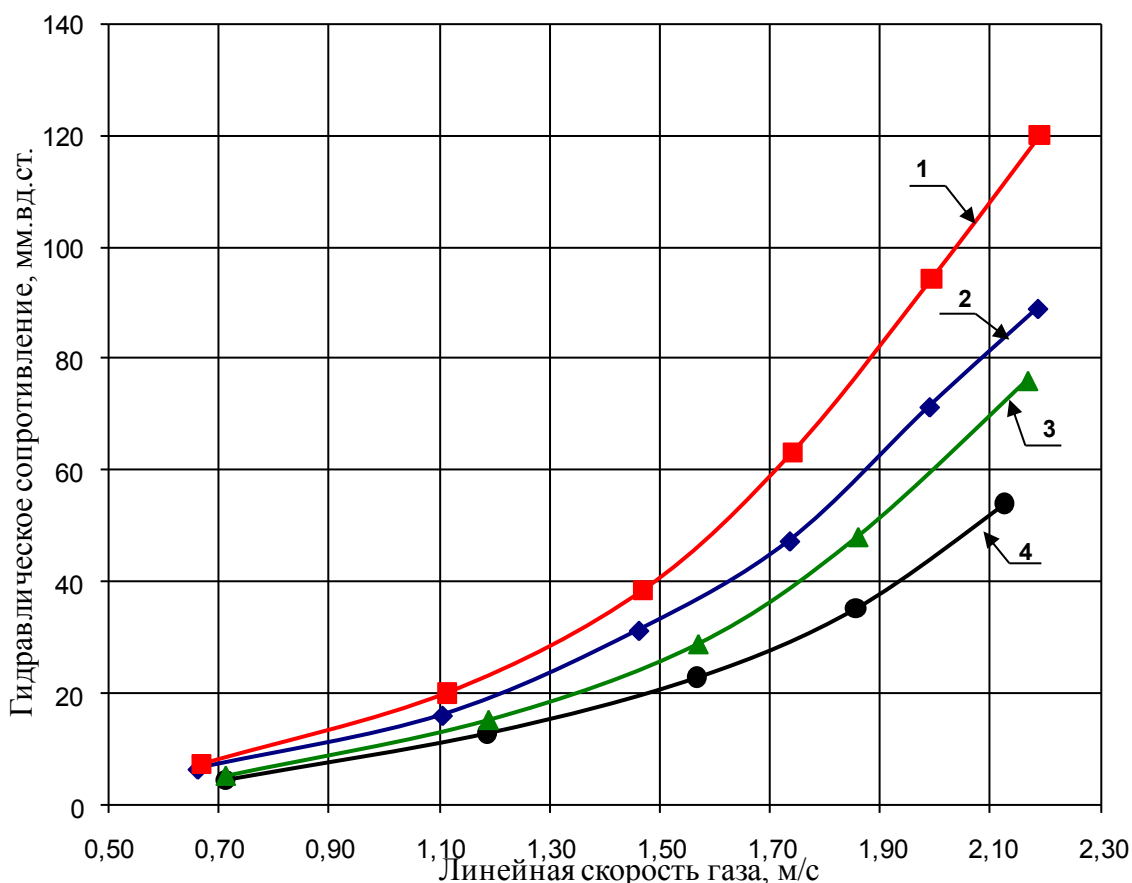


Рисунок 4 – Зависимость гидродинамического сопротивления орошаемых насадок от линейной скорости газа:

1, 2 – кольца Рашига, плотность орошения 20 и 10 м³/(м²час) соответственно;
3, 4 – гофрированная винтовая насадка, плотность орошения 20 и 10 м³/(м²час) соответственно.

При орошении насадки, гидравлическое сопротивление возрастает за счет многих параметров: уменьшения свободного объема, волнообразования на текущей пленке и др. Установление зависимости ΔP от всех этих параметров представляется достаточно сложным, поэтому воспользуемся известным выражением, которое связывает отношение сопротивления орошаемой и сухой насадок [2]

Представленные экспериментальные данные также были обработаны методом наименьших квадратов для получения зависимости отношения гидравлического сопротивления $\Delta P_{ор.}$ к сопротивлению сухой насадки ΔP как функции плотности орошения L . В результате были получены следующие выражения:

– для насадочных элементов – гладких колец Рашига:

$$\frac{\Delta P_{ор.}}{\Delta P_{сух.}} = 1,01 \cdot 10^{0,012L} \quad (6)$$

– для новых насадочных элементов – гофрированных колец:

$$\frac{\Delta P_{op.}}{\Delta P_{сх.}} = 0,85 \cdot 10^{0,013L} \quad (7)$$

Выводы

1. Исследования показали, что выполненные изменения конструкции колец Рашига позволили снизить их гидродинамическое сопротивление на 20–25 % (в зависимости от режима работы колонны).
2. Снижение гидродинамического сопротивления обеспечивает сокращение энергозатрат [3].
3. Ввиду увеличения свободного объема возрастает пропускная способность колонны, что позволяет уменьшить ее размер при сохранении заданного технологического режима работы.

Библиографический список

1. Пат. № 2370311.Россия.МПК В01J 19/30. Насадка для массообменных аппаратов / Муравьев В.Е., Соколов А.С., Данилов Ю.Б., Сулима А.Н., Тошинский В.И., Медяник А.В. и др.; заявитель и собственник ООО "Гипрохим"; заявл. 03.03.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29.
2. Рамм, В. М. Абсорбция газов / М.Н. Ратманский.- М.: Химия, 1975.- с.341-347.
3. Ключко, В.В. Разработка и внедрение насадочных колонн с пространственно-структурированными контактными устройствами / В.В. Ключко, Л.П. Холпанов, Г.К. Зиберт, В.А. Ставицкий // Химическая технология.- 2004.- № 9.- с.40-44.

розглядаються порівняльні гідродинамічні характеристики нових масообмінних насадок та кілець Рашига. Аналіз отриманих експериментальних даних показує, що зміна в геометрії кілець Рашига призводить до зменшення гідродинамічного опору та, відповідно, до енергозбереження.

Comparative hydrodynamic features of the new packed beds and Raschig rings are examined. Obtained experimental data show that changes in the geometry form of Raschig rings lead to reduction of hydrodynamic resistance and to energy-saving, consequently.